



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 0 977 059 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
02.02.2000 Patentblatt 2000/05

(51) Int. Cl.⁷: **G02B 3/08, B29D 11/00**

(21) Anmeldenummer: **99112693.9**

(22) Anmeldetag: **02.07.1999**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE**
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(72) Erfinder: **Scheer, Ulla
72827 Wannweil (DE)**

(30) Priorität: **31.07.1998 DE 19834521**

(74) Vertreter:
**Heiland, Karsten, Dipl.-Ing. et al
Meissner, Bolte & Partner
Anwaltssozietät GbR
Hollerallee 73
28209 Bremen (DE)**

(71) Anmelder:
**aqua signal Aktiengesellschaft
Spezialleuchtenfabrik
28307 Bremen (DE)**

(54) **Verfahren zur Herstellung einer Flächenlinse auf katadioptrischer Basis sowie nach diesem Verfahren hergestellte Flächenlinse**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Flächenlinse mit stufenförmiger Eintrittsfläche, Reflektionsflächen und Austrittsfläche. Die Eintrittsfläche ist unterteilt in äußere konzentrische Stufen und ein Mittelteil. Das Mittelteil ist auf einer Eintrittsseite asphärisch gekrümmt und auf einer Austrittsseite plan unter Einhaltung der Eikonalbedingung. Jede Stufe weist Oberseite, Unterseite und Außenseite auf, wobei Oberseiten und Unterseiten plan ausgeführt sind und die Außenseiten zur Einhaltung der Eikonalbedingung entsprechende Krümmungen aufweisen.

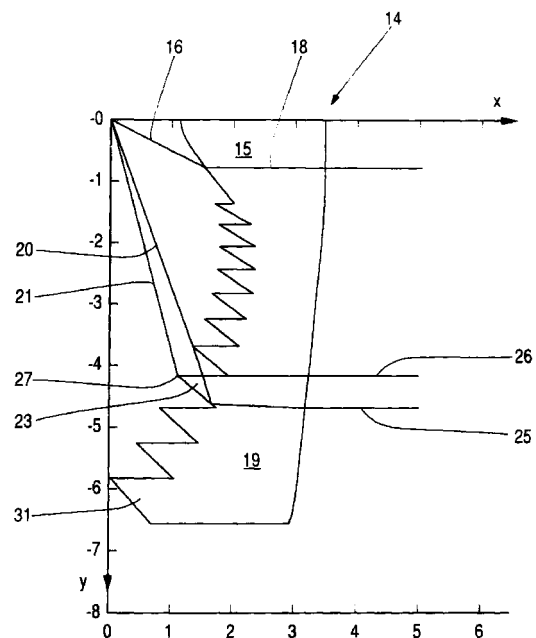


Fig. 3

EP 0 977 059 A2

Beschreibung

5 [0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Flächenlinse auf katadioptrischer Basis mit stufenförmiger Eintrittsfläche, Reflektionsflächen und zumindest teilweise gekrümmter Austrittsfläche. Weiterhin betrifft die Erfindung eine Flächenlinse.

10 [0002] Aus der US 5 404 869 ist eine Flächenlinse bekannt, mit der die Lichtstrahlen einer punktförmigen Lichtquelle durch geeignete Strahlführung parallelisiert werden. Der besondere Vorteil der Linse besteht in der geringen Bauhöhe, dem großen Durchmesser und dem kurzen Abstand zwischen Linse und Lichtquelle. Möglich wird dies durch einen stufenförmigen Aufbau der Flächenlinse. In einem mittigen Bereich weist die Linse eine gekrümmte Eintrittsfläche und eine ebenfalls gekrümmte Austrittsfläche auf, vergl. Fig. 23 der Schrift. Außerhalb des mittigen Bereiches sind konzentrische Stufen angeordnet, beispielsweise 11 Stufen. Jede Stufe kann als prismatisches Element (oder Ringprisma) betrachtet werden und weist eine Eintrittsfläche (Oberseite) eine Reflektionsfläche (Unterseite) und eine Austrittsfläche auf. Oberseite und Unterseite sind jeweils eben, während die Austrittsfläche jeweils gekrümmt ist.

15 [0003] Für die Erzielung einer optimalen Lichtausbeute müssen die Lichtstrahlen exakt geführt werden. Entsprechend ist die Geometrie der einzelnen Stufen genau zu berechnen. In Kenntnis der optimalen Gestalt der einzelnen Stufen und des Mittenbereichs lassen sich Werkzeugmaschinen zur Herstellung einer entsprechenden Flächenlinse oder einer Gußform hierfür programmieren. Aufgrund der rotationssymmetrischen Ausbildung der Flächenlinse genügen für eine eindeutige Beschreibung der Form die Ermittlung der Daten eines radialen Querschnitts und zwar von der Linsenmitte bis zum Außenrand (oder umgekehrt).

20 [0004] Nach dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die Form der Flächenlinse wie folgt bestimmt:

a) ein radialer Querschnitt (14) wird stufenweise bestimmt, und zwar zunächst für eine beliebige erste Stufe (Stufe 1), dann für die hierzu benachbarten Stufen, danach sukzessiv für alle weiteren benachbarten Stufen bis die Querschnitte der einzelnen Stufen alle bestimmt sind,

25

b) ausgehend von

- vorbestimmten Winkeln

30

$$\alpha_{A_i}$$

- von Oberseiten der Stufen relativ zu einer Mittelachse (x-Achse) der Linse, den Koordinaten

35

$$(x_{A_1}, y_{A_1})$$

- eines Eckpunktes A_1 der ersten Stufe bezogen auf den Ort (0,0) einer punktförmigen Lichtquelle (11),
- den Winkelbereichen, in welchen die einzelnen Stufen (i) Licht aufnehmen,
- einer Koordinate fl_{x_1} eines äußersten Punktes (fl_{x_1}, fl_{y_1}) des Abschnitts der Austrittsfläche (13) der zur ersten Stufe (i=1) gehört,
- und einem Winkel δ_1 einer Reflektionsfläche der ersten Stufe,

45 c) werden zunächst die Koordinate fl_{y_1} des äußersten Punktes (fl_{x_1}, fl_{y_1}), das Eikonale und die weiteren Koordinaten (fl_{x_1}, fl_{y_1}) der Austrittsfläche (13) für die erste Stufe ermittelt und zwar für eine der gewünschten Genauigkeit entsprechende Anzahl an Lichtstrahlen,

50 d) auf der Basis der für die erste Stufe ermittelten Daten werden die Daten einer zweiten Stufe, dann einer dritten Stufe, usw., insgesamt für alle Stufen, ermittelt,

e) schließlich werden für einen keine Reflektionsflächen aufweisenden Mittenbereich (Mittelteil 15) der Linse (10) die Daten einer gekrümmten Eintrittsfläche (Innenfläche 28) unter Beachtung der Eikonalebedingung und unter Vorgabe der Austrittsfläche (13) ermittelt,

55

f) die komplette äußere Form der Linse (10) wird durch Rotation des radialen Querschnitts (14) um eine Mittelachse (x-Achse) bestimmt.

[0005] Die beschriebene Vorgehensweise ermöglicht eine schnelle Bestimmung der kompletten äußeren Form der Flächenlinse für unterschiedliche Ausgangsdaten und verschiedene Anwendungszwecke.

[0006] Vorteilhafterweise werden folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- 5 - die punktförmige Lichtquelle steht im Nullpunkt eines (xy) Koordinatensystems,
- das Mittenteil der Linse weist eine asphärische Eintrittsfläche und eine ebene Austrittsfläche auf,
- die Oberseiten aller Stufen verlaufen parallel zur x-Richtung,
- der Eckpunkt (Schnittpunkt Oberseite und Unterseite) der äußersten Stufe (1. Stufe) liegt auf der y-Achse,
- jede Stufe nimmt Licht aus einem 5°-Winkelbereich auf.

10

[0007] Besonders vorteilhaft ist eine Vorgehensweise bei der ein Winkel der Reflektionsfläche zur Eintrittsfläche in jeder Stufe so gewählt wird, daß ein Strahlenabschnitt iii des äußeren Randstrahls a in diesem Bereich einen möglichst kleinen Winkel mit der Eintrittsfläche bildet. Dunkle Zonen nach dem Austritt des Lichts aus der Linse werden so weitgehend vermieden.

15

[0008] Für die Ermittlung der Daten der ersten Stufe stehen die Größen δ, flx_1, fly_1 in Wechselwirkung zueinander. Entweder werden δ_1 und flx_1 oder aber flx_1 und fly_1 vorgegeben und der jeweils andere Wert ermittelt. Bei Vorgabe von δ_1 und flx_1 ergibt sich fly_1 durch Schnitt des an der Reflektionsfläche reflektierten Strahls als Abschnitt des inneren Randstrahls b der ersten Stufe mit der durch flx_1 definierten Ebene. Der Begriff "innerer" Randstrahl bezieht sich auf die Anordnung vor Eintritt der Strahlen in die Linse. Die der Mittelachse der Linse nächstliegenden Randstrahlen werden als innere Randstrahlen bezeichnet, die dem Umfang der Linse jeweils nächstliegenden Randstrahlen werden als äußere Randstrahlen bezeichnet. Innerhalb der Linse kreuzen sich die Randstrahlen, so daß der innere Randstrahl b der ersten, äußeren Stufe auf der Austrittsseite den äußersten Rand markiert.

20

[0009] Bei der Festlegung der Größen flx_1 und fly_1 kann von Schätz- oder Erfahrungswerten ausgegangen werden. Jedenfalls soll flx_1 wesentlich größer sein als die x-Koordinate für den Eckpunkt der ersten Stufe, ebenso soll fly_1 wesentlich größer sein als die y-Koordinate des Eckpunkts der ersten Stufe. Dabei legt flx_1 weitgehend die Dicke der Linse fest, während fly_1 den Durchmesser der Linse betrifft. Wichtig ist die Einhaltung der Eikonbedingung innerhalb jeder Stufe. D. h., daß die Summen der optischen Weglängen der Strahlen innerhalb jeder Stufe übereinstimmen. Bekanntermaßen ergibt sich die optische Weglänge eines Lichtstrahls aus der geometrischen Weglänge multipliziert mit dem Brechungsindex. Im Normalfall ergeben sich drei unterschiedliche Zonen mit verschiedenen optischen Weglängen, nämlich Eintrittsseite (Luft), Linsenmaterial, Austrittsseite (Luft). Die geometrische Weglänge endet an einer Referenzebene, die irgendwo hinter der Austrittsseite der Linse angenommen werden kann und die naturgemäß senkrecht zur Mittelachse der Linse bzw. zur optischen Achse verläuft. Die Strahlführung wird dabei so berechnet, daß die einzelnen Lichtstrahlen parallel zueinander und senkrecht auf die Referenzebene auftreffen. Mit einer derartigen Linse ergibt sich ein Höchstmaß an Lichtausbeute bei gleichmäßiger Verteilung des Lichts. Denkbar ist auch eine Aufweitung des Lichtstrahls oder eine Fokussierung desselben. Die Referenzebene muß dann als - von der Lichtquelle aus gesehen - konkave oder konvexe Fläche angenommen werden.

25

30

35

[0010] Eine Besonderheit ist die Bestimmung der Daten der zweiten Stufe nach Festlegung der ersten Stufe. Hierzu werden zwei Iterationsschritte ineinander verschachtelt ausgeführt. Zunächst wird ein Schätzwert für die x-Koordinate des Eckpunkts A_2 der zweiten Stufe, nämlich

40

$$x_{A_2},$$

angenommen. Da die Winkelbereiche, in denen die Stufen Licht aufnehmen bekannt sind, ebenso die Winkel

45

$$\alpha_{A_i}$$

der Oberseiten der Stufen i, kann die y-Koordinate des Eckpunkts A_2 und damit der Punkt

50

$$(x_{A_2}, y_{A_2})$$

55

errechnet werden. Danach wird der Winkel δ_2 der Reflektionsfläche der zweiten Stufe iterativ ermittelt, bis ein Strahlenabschnitt y_{iii} für einen inneren Randstrahl b der zweiten Stufe auf dem Punkt mit den Koordinaten (flx_2, fly_2) liegt, wobei (flx_2, fly_2) der nächstliegenden Koordinate (flx_1, fly_1) der ersten Stufe dem dortigen Randstrahl a entspricht. Schließlich wird der Winkel zwischen dem inneren Randstrahl b der zweiten Stufe und dem äußeren Randstrahl a der ersten Stufe

vor Austritt aus der Linse überprüft und minimiert durch Variation von

$$x_{A2}$$

5

und anschließende Iteration von δ_2 . Sobald der Winkel δ_2 der Reflektionsfläche der zweiten Stufe feststeht, können alle weiteren Koordinaten (fx_2, fly_2) unter Beachtung der Eikonbedingung (innerhalb der zweiten Stufe) ermittelt werden.

[0011] Die erfindungsgemäße Linse ist nach dem voranstehend beschriebenen Verfahren hergestellt. Die nach der Bestimmung der geometrischen Form durchzuführenden weiteren Herstellungsschritte können unterschiedlich sein.

10 Wichtig in diesem Zusammenhang ist das für die Linse verwendete Material. Vorzugsweise wird Preßglas, Polycarbonat oder PMMA (Acryl) verwendet. Aufgrund der ermittelten Form der Linse kann eine Gußform für dieselbe hergestellt werden. So können die ermittelten Daten unmittelbar eine entsprechende Werkzeugmaschine ansteuern. Denkbar ist auch die Herstellung als Drehteil mit unter Berücksichtigung der ermittelten Daten durchzuführenden Dreh- und Poliervorgängen. So können beispielsweise durch Spanen die Oberflächen auf Vorder- und Rückseite der Linse bis auf ein Übermaß von $\frac{1}{100}$ Millimeter oder weniger bearbeitet und anschließend ein oder mehrere Poliervorgänge zur Erzielung der endgültigen Form durchgeführt werden.

15

[0012] Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Patentansprüchen und der Beschreibung im übrigen.

[0013] Nachfolgend wird ein Ausführungsbeispiel an Hand von Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

20 Fig. 1 einen halben Querschnitt einer konstruierten Linse,

Fig. 2 die Linse in Draufsicht,

Fig. 3 Strahlenverläufe in der Linse,

25

Fig. 4 eine Stufe der Linse im Querschnitt mit kennzeichnenden Größen in nicht maßstabsgerechter Darstellung,

Fig. 5 den halben Querschnitt der Zonenlinse mit Koordinatenangaben.

30 **[0014]** Es soll eine strahlenführende Flächenlinse 10 konstruiert werden, die das gesamte Licht einer Punktlichtquelle 11 aus einem offenen Halbraum sammelt und als paralleles Licht weiterleitet. Die Linse 10 besteht aus einer stufenförmig angeordneten Eintrittsfläche 12 und einer asphärisch gekrümmten Austrittsfläche 13. Die Berechnungen basieren auf den Grundlagen der geometrischen Optik unter Berücksichtigung der Eikonbedingung (gleiche optische Weglängen). Als Lichtquelle wird eine LED-ND Diode (Wellenlänge $\lambda = 632$ Nanometer) angenommen. Auf der Basis vorbestimmter Ausgangsparameter werden die für eine Fertigung der Linse erforderlichen Konstruktionsdaten ermittelt.

35

A. Prinzipielle Form der Linse

[0015] In Fig. 1 ist ein halber Querschnitt 14 der konstruierten Flächenlinse 10 dargestellt. Zur Berechnung wird die Punktlichtquelle 11 im Punkt $(0,0)$ eines x, y -Koordinatensystems angenommen. Die der Lichtquelle 11 zugewandte Seite (Eintrittsfläche 12) der Linse 10 besteht aus einem asphärischen Mittelteil 15 und elf nach außen hin in ihrer Dimension zunehmenden Stufen, wobei die äußerste Stufe als Stufe 1 bezeichnet wird. Die Krümmung der Außenseite (Austrittsfläche 13) der Linse 10 wird über die Eikontheorie derart berechnet, daß die austretenden Strahlen hinter der Linse 10 parallel zur x -Achse verlaufen. Dabei ist die x -Achse zugleich Mittelachse der Linse 10.

45 **[0016]** Die in Fig. 1 verwendete Skala ist in willkürlichen Einheiten angegeben, so daß zwar die Größenverhältnisse, nicht aber die realen Dimensionen der Linse 10 gezeigt sind. Diese lassen sich durch Wahl des Durchmessers der Linse 10 festlegen. Durch Rotation des Umrisses um die x -Achse erhält man die vollständige dreidimensionale Gestalt der Linse 10, wie in Fig. 2 in der Draufsicht dargestellt.

50 B. Strahlenverlauf in der Linse

[0017] Ein Strahl 16, der im Mittenbereich 15 der Linse 10 auf die asphärische Kuppel 17 einfällt, wird in einen zur x -Achse parallel verlaufenden Strahl 18 gebrochen und trifft senkrecht auf die Austrittsfläche 13, siehe Fig. 3. Die im Außenbereich 19 der Linse 10 einfallenden Strahlen 20, 21 werden zunächst beim Eintritt an einer Oberseite 22 der entsprechenden Stufe 23 gebrochen, dann an einer Unterseite 24 der Stufe total reflektiert und verlassen als Parallelstrahlen 25, 26 nach erneuter Brechung an der in diesem Bereich gekrümmten Austrittsfläche 13 die Linse 10, siehe Fig. 1 und 3, in denen der beschriebene geometrisch-optische Verlauf dargestellt ist. Die in diesem Fall für die vierte Stufe 23 eingezeichneten Strahlenverläufe sind dabei als Grenzfälle (Randstrahlen) der innerhalb des von diesen

55

Strahlen begrenzten Winkelbereichs einfallenden Strahlen zu betrachten. Ein auf eine Kante 27 (Eckpunkt) einer Zone bzw. Stufe treffender Lichtstrahl führt in der Praxis zu Streulicht.

5 **[0018]** Im folgenden werden die die Form der Linse 10 und den Strahlenverlauf kennzeichnenden Parameter erläutert. Die Größen beziehen sich dabei auf den Querschnitt der rotationsymmetrischen Zonenlinse 10 entlang eines Durchmessers. Einige der Winkelgrößen und Koordinaten, die bei der Konstruktion der Stufen im Außenbereich 19 der Linse 10 verwendet werden, sind in der nicht maßstabsgerechten Fig. 4 dargestellt.

B. I. Mittenteil der Linse:

10 **[0019]** (f_{xM}, f_{yM}) : Koordinaten eines Punktes auf einer asphärischen Innenfläche 28 des Mittelteils 15 α_M : Winkel zwischen dem von $(0,0)$ ausgehenden und in (f_{xM}, f_{yM}) einfallenden Strahl (z. B. Strahl 16) und der x-Achse.

15 **[0020]** In diesem Bereich verläuft die Austrittsfläche 13 der Linse 10 senkrecht zur x-Achse. Die x-Koordinate dieses Teils der Austrittsfläche wird durch den zur 11. Stufe 29 (bei insgesamt 11 Stufen) gehörenden Abschnitt der Austrittsfläche 13 bestimmt.

B. II. Stufenförmiger Bereich der Linse:

20 **[0021]** Die Oberseite 22 der jeweiligen Stufe wird mit I, die Unterseite 24, an der die Totalreflektion stattfindet, mit II bezeichnet, wobei diese Grenzflächen plan verlaufen, während der zugehörige Abschnitt der gekrümmten Austrittsfläche 13 mit III bezeichnet wird und aus der Eikonalbedingung zu berechnen ist, siehe Fig. 4. Ein Datenvektor mit den Einträgen (f_{x_i}, f_{y_i}) beschreibt die Grenzfläche III der i-ten Stufe.

25
$$(x_{A_i}, y_{A_i})$$

kennzeichnen die Koordinaten der Eckpunkte der i-ten Stufe im Querschnitt, während

30
$$(x_{E_i}, y_{E_i})$$

die Eckpunkte im Querschnitt beim Übergang von der vorherigen zur Stufe i angeben. Die Oberseite 22 der i-ten Stufe schließt mit einer Parallelen zur x-Richtung einen Winkel

35
$$\alpha_{A_i}$$

40 ein, die Unterseite 24 mit einer Parallelen zur x-Achse einen Winkel δ_i . Randstrahlen a_i, b_i , die gerade noch von der i-ten Stufe erfaßt werden, treffen unter dem Winkel

45
$$\alpha_{a_i}$$

bzw.

50
$$\alpha_{b_i}$$

auf die Grenzfläche I der i-ten Stufe.

55 **[0022]** Zur Beschreibung des Strahlenverlaufes werden die folgenden Größen verwendet (der Index i kennzeichnet dabei die i-te Stufe), siehe insbesondere Fig. 4:

α_{1i} : Einfallswinkel zur Grenzfläche I_i

5 α_{2i} : Ausfallswinkel nach Brechung an Grenzfläche I_i

10 β_{1i} : Einfallswinkel zur Grenzfläche II_i

β_{2i} : Ausfallswinkel nach Totalreflektion an Grenzfläche II_i

15 γ_{3i} : Winkel des Lichtstrahls nach Totalreflektion an
20 Grenzfläche II_i (gemessen relativ zur x-Achse)

25 (x_{S1i}, y_{S1i})

geben die Koordinaten der Schnittpunkte der Strahlenabschnitte mit Grenzfläche I_i an und entsprechend

30 (x_{S2i}, y_{S2i})

die Koordinaten der Schnittpunkte der Strahlenabschnitte mit Grenzfläche II_i . Der Übersicht halber wurden in Fig. 4 die die Stufe kennzeichnenden Indizes bei den Winkelgrößen und Koordinaten weggelassen. Dafür bezeichnen die Anga-
35 ben i, ii, iii in Fig. 4 die drei unterschiedlichen Abschnitte des Strahlenverlaufs von der Lichtquelle bis zur Grenzfläche III (Austrittsfläche 13).

[0023] Die Punktlichtquelle befindet sich in $(x_p, y_p) = 0,0$. Es wird zunächst mit den Brechungsindizes $n_L = 1$ für Luft und $n_{PM} = 1,493$ für PMMA (Acryl) bei der Wellenlänge $\lambda = 632$ Nanometer gerechnet. Der Brechungsindex ist jedoch in der Rechnung variierbar.

40 C. Konstruktion der Linse

[0024] Ausgehend von weiter unten noch erläuterten Eingabeparametern wird die Form der Linse von außen nach innen berechnet.

45 Eingabe Parameter

[0025] Für die Berechnung der Linsenform ist die Vorgabe der folgenden Größen erforderlich:

50 $\alpha_{A_i}, (x_{A_i}, y_{A_i})$

[0026] Weiterhin muß festgelegt werden, in welchem Winkelbereich die einzelnen Stufen Licht aufnehmen sowie Koordinaten (fl_{x_1}, fl_{y_1}) des äußersten Punktes des Abschnittes der Austrittsfläche 13, der zur ersten Stufe gehört, alternativ auch δ_1 und fl_{x_1} . Mit diesem Wert wird praktisch die Dicke der Linse festgelegt. Die Anzahl der Stufen kann in
55 gewissen Grenzen variiert werden (siehe weiter unten unter der Überschrift C. II. Mittenteil).

[0027] Für die hier konstruierte Linse wurde

$$\alpha_{A_i}$$

5 = 0 festgelegt, so daß die Oberseiten 22 aller Stufen parallel zur x-Richtung verlaufen. Jede Stufe nimmt an der entsprechenden Stelle Licht aus einem 5°-Winkelbereich auf.

10 **[0028]** Im folgenden werden die theoretischen Grundlagen zur Konstruktion des stufenförmigen Bereiches und des Mittelteils 15 der Linse 10 und zur Simulation des Strahlenverlaufes dargestellt. Der Übersicht halber werden bei den Stufen die Winkelgrößen und Koordinaten ohne den die Stufe kennzeichnenden Index angegeben.

C. I. Stufenförmiger Bereich der Linse

Berechnung des Schnittpunktes des einfallenden Lichtstrahls mit der Oberseite einer Stufe

15 **[0029]** Nachfolgend sind Gleichungen (1) bis (31) zitiert. Diese sind auf gesonderten Blättern am Ende der Beschreibung wiedergegeben.

[0030] Ein Lichtstrahl, der mit der x-Achse einen Winkel α einschließt, trifft unter dem Winkel

20 Gl. (1)

auf die Oberseite einer Stufe. Die Koordinaten des entsprechenden Schnittpunktes (x_{S_1}, y_{S_1}) erhält man aus dem Schnitt der Nullpunkts-Geraden y_i , die den ersten Abschnitt i des Strahlenverlaufes beschreibt, mit der Geraden y_l der Seitenfläche I. Gerade y_l verläuft durch den Eckpunkt (x_A, y_A) mit der Steigung $\tan(\alpha_A)$.

25 **[0031]** Schnitt y_l mit y_i :

Gl. (2)

Gl. (3)

Gl. (4)

30 Gl. (5)

Berechnung des Schnittpunktes des gebrochenen Lichtstrahls mit der Unterseite einer Stufe

35 **[0032]** Nach der Brechung an der Oberseite 22 der Stufe beim Eintritt in die Linse 10 trifft der Lichtstrahl auf die Unterseite 24 und wird dort total reflektiert. Der Strahlenabschnitt ii zwischen

$$(x_{S_1}, y_{S_1}) \text{ und } (x_{S_2}, y_{S_2})$$

40 hat die Steigung $m = -\tan(90^\circ - \alpha_A - \alpha_2)$, wobei sich $\alpha_2 = \arcsin(n_L / n_{PM}) \sin \alpha_1$ nach dem Brechungsgesetz berechnen läßt.

$$(x_{S_2}, y_{S_2})$$

45 ist der Schnittpunkt der Gerade ii mit der Seitenfläche II, beschrieben durch y_{II} :

Gl. (6)

Gl. (7)

50 Gl. (8)

Gl. (9)

55 **[0033]** Dabei ist δ der Winkel zwischen der Unterseite einer Stufe und einer Parallelen zur x-Achse (vergl. Fig. 4). Die Winkel δ und α_A ergeben zusammen den Innenwinkel einer Stufe. Die Berechnung von δ erfolgt auf numerischem Wege und wird mit Hilfe der Daten der vorherigen Stufe durchgeführt. Die Bestimmung von δ wird weiter unten unter der Überschrift "Sukzessive Konstruktion des stufenförmigen Bereiches" erläutert.

Strahlenverlauf nach der Totalreflektion an der Unterseite einer Stufe

[0034] Der Strahlenabschnitt iii nach der Totalreflektion an der Unterseite einer Stufe bis zur gekrümmten Außenfläche beginnt in

5

$$(x_{S_2}, y_{S_2})$$

10 und hat die Steigung $\tan \gamma_3$:

Gl. (10).

[0035] Bestimmung des Winkels γ_3 zwischen dem an Grenzfläche II total reflektierten Strahl und einer Parallelen zur x-Richtung:

15

[0036] β_2 , γ_3 und δ bilden einen 90° -Winkel (vergl. Fig. 4).

Gl. (11)

20 **[0037]** Totalreflektion:

$$\beta_2 = \beta_1$$

[0038] Der Winkel β_1 läßt sich über einen Hilfswinkel κ_1 ausdrücken:

25

Gl. (12)

[0039] Winkelsumme im Dreieck:

30

Gl. (13)

[0040] Ersetzung von α_2 über das Brechungsgesetz liefert:

Gl. (14)

35

[0041] Aus den Gleichungen (11) bis (14) ergibt sich für γ_3 :

Gl. (15)

40 **[0042]** Der Endpunkt von Geradenabschnitt iii wird mit (f_x, f_y) bezeichnet und ist aus der Eikonallbedingung zu bestimmen.

Strahlenverlauf hinter der Linse

45 **[0043]** Nach dem Austritt aus dem Prismenelement soll der Strahlenverlauf parallel zur x-Achse sein. Dieser Strahlenabschnitt verläuft zwischen (f_x, f_y) und (r, f_y) , wobei r die x-Koordinate einer willkürlich gewählten Referenzebene ist.

Berechnung des Eikonals und der Grenzfläche III

50

[0044] Für einen in

$$(x_{S_1}, y_{S_1})$$

55

auf die Stufe treffenden Strahl erhält man als zurückgelegten optischen Weg C vom Ausgangspunkt (Lichtquelle) bis zum Auftreffen auf die Referenzebene

Gl. (16).

5 **[0045]** C wird als Konstante für alle auf eine Stufe einfallenden Lichtstrahlen festgelegt. Der Wert von C ändert sich von Stufe zu Stufe. Als Wert für C wird der optische Weg des Strahls b benutzt, der den Winkelbereich der auf eine Stufe einfallenden Strahlen zur Mitte hin begrenzt (siehe Fig. 3, mittlerer eingezeichneter Strahl 20):

Gl. (17).

10 **[0046]** Die Lage der Referenzebene r kann dabei willkürlich festgelegt werden und hat keinen Einfluß auf die Form des zu berechnenden Prismenelementes. Die einzige Einschränkung ist, daß $r \geq fl_x$ gelten muß, das heißt, die Referenzebene liegt außerhalb der Linse. fl_{x_b} und fl_{y_b} lassen sich für die erste Stufe aus den Eingabeparametern entnehmen bzw. berechnen. Für jede weitere Stufe ergeben sich diese Größen aus den Daten der vorherigen Stufe. Die genaue Vorgehensweise zur Bestimmung fl_{x_b} und fl_{y_b} wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

15 **[0047]** Mit Gl. (16) lassen sich die Koordinaten (flx, fly) der gekrümmten Austrittsfläche 13 für jede Stufe bestimmen. Dazu wird Gl. (16) nach flx aufgelöst. Da der Punkt (flx, fly) Endpunkt des Geradenabschnittes y_{iii} ist, besteht nach Gl. X ein analytischer Zusammenhang zwischen flx und fly:

Gl. (18).

20 **[0048]** Einsetzen von Gl. (18) in Gl. (16) ergibt eine Gleichung in Abhängigkeit von flx, die analytisch nach flx aufgelöst werden kann:

Gl. (19)

25 **[0049]** Die nach Gl. (18) und Gl. (19) berechneten Datenvektoren (fl_{x_i}, fl_{y_i}) , die den Verlauf des Abschnittes der Grenzfläche III zur Stufe i beschreiben, ergeben zusammen (bis auf den Mittelteil 15) die Austrittsfläche 13 der Linse. Dabei ist zu beachten, daß die Abschnitte ohne Versetzung aneinander anschließen. Die Voraussetzungen dafür sowie die Bestimmung des Winkels δ und weiterer Größen, die sich jeweils aus den Daten der vorherigen Abschnitte ergeben, werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

30

Sukzessive Konstruktion des stufenförmigen Bereiches

1. Stufe

35 **[0050]** Alle Strahlen, die einen Winkel α im Bereich von 85° bis 90° mit der x-Achse bilden, sollen auf die erste Stufe 31 treffen. Vorteilhafterweise ist die erste Stufe 31 die äußerste Stufe. Möglich ist aber auch ein Beginn der Berechnung mit einer anderen Stufe. Jedenfalls ist die zweite berechnete Stufe benachbart zur zuerst berechneten Stufe angeordnet. Aus α_A und α lassen sich nach Gl. (1) und dem Brechungsgesetz

40

$$\alpha_{11} \text{ und } \alpha_{21}$$

berechnen (Index 1 für die erste Stufe). Mit

45

$$(x_{A1}, y_{A1})$$

ergibt sich nach den Gl. (4) und (5)

50

$$(x_{S11}, y_{S11}) \cdot$$

Für die Bestimmung von

55

$$(x_{S21}, y_{S21})$$

nach Gl. (8) und (9) ist die Kenntnis von δ_1 erforderlich. Dazu wird δ_1 in einem Iterationsverfahren variiert und für jeden Wert

5 $(x_{S_{21b}}, y_{S_{21b}})$ und γ_{31b}

nach Gl. (15) für den Randstrahl b der ersten Stufe ($\alpha = 85^\circ$) berechnet. δ wird solange variiert, bis der durch die Eingabe vorgegebene Punkt (fx_1, fly_1) auf dem nach Gleichung X gegebenen Strahlenabschnitt y_{iii} für Randstrahl b liegt:

10 Gl. (20)

bei den weiteren Stufen wird der Winkel δ auf eine entsprechende Art und Weise bestimmt, deren Ziel die Vermeidung von Dunkelzonen hinter der Linse ist. Dies wird weiter unten erläutert.

[0051] Mit

15 $(x_{S_{1_{1b}}}, y_{S_{1_{1b}}}), (x_{S_{2_{1b}}}, y_{S_{2_{1b}}}), (fx_{1b}, fly_{1b}) = (fx_1, fly_1)$

und einer willkürlich gewählten x-Koordinate r für die Referenzebene ist der Strahlenverlauf von Randstrahl b vorgegeben und es kann nach Gl. (17) der Wert des Eikonals für Stufe 1 berechnet werden. Mit diesem Wert werden für die erste Stufe nach Gl. (19) und Gl. (18) für jeden Winkel α im oben genannten Bereich die Koordinaten (fx_1, fly_1) bestimmt, die in einen Datenvektor geschrieben werden, der somit den ersten Abschnitt der gekrümmten Außenfläche beschreibt. Der erste Eintrag in diesen Datenvektor ist dabei der Wert (fx_{1a}, fly_{1a}) der für den unteren einfallenden Randstrahl a der ersten Stufe berechnet wird. Der letzte Eintrag ist der Wert (fx_{1b}, fly_{1b}) . Randstrahl a (Strahlen 21, 26 in Fig. 3) tritt aus der Linse als Parallelstrahl aus, der nach dem Linsendurchgang oberhalb des parallel austretenden Randstrahls b (Strahlen 20, 25 in Fig. 3) liegt.

25 [0052] Als Endpunkt

x_{E1}, y_{E1}

30 (des die Unterseite der Stufe 1 beschreibenden Geradenabschnitts

y_{Π_1}

35 (nach Gl. (7)) wird der Punkt auf

y_{Π_1}

40 gewählt, dessen y-Koordinate dem Wert fly_{1b} entspricht, d. h.:

Gl. (21)

Gl. (22)

45 Weitere Stufen

[0053] Die nächste Stufe soll alle in einem sich direkt an den Winkelbereich der vorherigen Stufe anschließenden Winkelbereich der Größe 5° einfallenden Strahlen aufnehmen. Dieser Bereich wird wieder von einem (modellhaften) unteren Randstrahl a (größeres α) und einem oberen Randstrahl b (kleineres α) begrenzt. Zunächst werden

α_{1jb} und α_{2jb}

55 bestimmt. Zur Bestimmung von

$$(x_{S_{1ib}}, y_{S_{1ib}})$$

5 muß

$$(x_{A_i}, y_{A_i})$$

10 bekannt sein. In einem dem Iterationsverfahren zur Bestimmung von δ_i übergeordneten Iterationsverfahren wird zunächst ein Wert für

$$15 \quad x_{A_i}$$

geschätzt. Die entsprechende y-Koordinate

$$20 \quad y_{A_i}$$

ergibt sich aus der Bedingung, daß die Ecke

$$25 \quad (x_{A_i}, y_{A_i})$$

dieser Stufe auf dem ersten Strahlenabschnitt des Randstrahls b des Winkelbereichs der vorherigen Stufe liegt. Dieser erste Strahlenabschnitt reicht von der Punktlichtquelle in (0,0) bis zum Schnittpunkt mit der Oberseite der vorherigen Stufe und läßt sich nach Gl. (2) bestimmen. Durch diese Bedingung ist gewährleistet, daß diese Stufe i nicht den Winkelbereich der auf Stufe i-1 einfallenden Strahlen abschattet. Nach Gl. (2) ergibt sich somit:

Gl. (23).

35 **[0054]** Mit diesem Schätzwert für

$$(x_{A_i}, y_{A_i})$$

40 wird wie oben für die erste Stufe beschrieben in einem Iterationsverfahren δ_i bestimmt. Dazu werden

$$(x_{S_{2ib}}, y_{S_{2ib}}) \quad \text{und} \quad \gamma_{3ib}$$

45 für den Randstrahl b bestimmt und δ_i solange variiert, bis Randstrahl b dieser Stufe durch den oberen Randpunkt ($fx_{(i-1)a}$, $fy_{(i-1)a}$) des für die vorherige Stufe bestimmten Abschnitts der gekrümmten Außenfläche geht, d. h. dessen Koordinaten dem ersten Eintrag des Datenvektor für Grenzfläche III der vorherigen Stufe entsprechen. Anschaulich bedeutet dies, daß sich Randstrahl a der vorherigen Stufe und Randstrahl b der Stufe i in einem Punkt der Außenfläche schneiden, bevor sie beide zu Parallelstrahlen gebrochen werden. Bei der Simulation wird dabei für Randstrahl a der vorherigen Stufe der unterseitige Grenzwert der Krümmung für die Brechung an Grenzfläche III angenommen, für Randstrahl b der oberseitige Grenzwert der Krümmung. In der Praxis entsteht an dem Schnittpunkt der beiden Strahlen ein Knick nicht definierbarer Steigung. Alle unterhalb bzw. oberhalb dieses Schnittpunktes auftreffenden Strahlen werden jedoch an der entsprechend gekrümmten Fläche zu Parallelstrahlen gebrochen.

55 **[0055]** Würden sich Randstrahl a der vorherigen Stufe und Randstrahl b der Stufe i nicht in einem Punkt der Außenfläche, sondern innerhalb der Linse schneiden, dann würden nah benachbarte Strahlen von Randstrahl b der Stufe i auf eine Krümmung der Außenfläche treffen, die für Strahlen der vorherigen Stufe berechnet wurde und somit nicht zu Parallelstrahlen beim Austritt aus der Linse gebrochen werden.

[0056] Läge der Schnittpunkt außerhalb der Linse, so würde hinter der Linse theoretisch eine Zone entstehen, deren

Breite dem vertikalen Abstand der Schnittpunkte der Randstrahlen mit Grenzfläche III entspräche und in die kein Licht eintreten würde. Diese Dunkelzonen jedoch wären bei geringer Ausdehnung in der Praxis aufgrund der endlichen Ausdehnung der Lichtquelle sowie durch Streulicht nicht erkennbar.

[0057] Die oben beschriebene Bedingung gewährleistet auch, daß die für die einzelnen Stufen berechneten Abschnitte der Linsenaußenfläche zusammen eine stetige Fläche bilden.

[0058] Nach der Bestimmung von δ_i wird, wie bereits für die erste Stufe beschrieben, der Eikonalwert für den Randstrahl b der i-ten Stufe nach Gl. (17) aus

$$(x_{S_{1_{ib}}}, y_{S_{1_{ib}}}), (x_{S_{2_{ib}}}, y_{S_{2_{ib}}}), (fx_{ib}, fly_{ib}) \text{ und } r$$

berechnet. Mit diesem Wert läßt sich der Strahlenverlauf des Randstrahls a dieser Stufe mit den Gl. (8) bis (9) für den gewählten Schätzwert für

$$(x_{A_j}, y_{A_j})$$

berechnen. Iterativ wird jetzt

$$x_{A_j}$$

solange variiert, bis der Geradenabschnitt iii des Randstrahls a zwischen

$$(x_{S_{2_{ia}}}, y_{S_{2_{ia}}})$$

und (fx_{ia}, fly_{ia}) parallel zur Oberseite der Stufe i verläuft (vergl. Fig. 3), d. h.

Gl. (24).

[0059] Zu jedem neuen Wert für

$$x_{A_j}$$

wird auch δ_i neu durch das oben beschriebene Iterationsverfahren bestimmt. Dadurch, daß Randstrahl a im Modell entlang der Oberseite der Stufe verläuft, wird eine maximale vertikale Ausdehnung des zur Stufe i bestimmten Abschnittes der Grenzfläche III erreicht, bei der noch alle auf Stufe i einfallenden Strahlen bis zur Außenfläche der Linse gelangen.

Nach Bestimmung des optimalen Wertes für

$$x_{A_j}$$

werden für alle Strahlen des von Randstrahl a und b aufgespannten Bereiches die Koordinaten fx_j, fly_j mit der Eikonalbedingung bestimmt, die zusammen einen den entsprechenden Außenflächenabschnitt (Austrittsfläche 13) beschreibenden Datenvektor mit (fx_{ia}, fly_{ia}) als ersten und (fx_{ib}, fly_{ib}) als letzten Eintrag ergeben.

[0060] Die Lagen der tiefer liegenden Kanten E der Zonenlinse, in Fig. 4 beschrieben durch den Eckpunkt (x_E, y_E) ergeben sich aus dem Schnitt der Oberseiten 22 einer Stufe i mit den Unterseiten 24 der nächsten Stufe i+1. Für die Koordinaten

$$(x_{E_{j,(i-1)}}, y_{E_{j,(i-1)}})$$

des Schnittpunktes von Grenzfläche II der Stufe i und Grenzfläche I der Stufe i-1 erhält man mit Gl. (7) und Gl. (3):

Gl. (25)

Gl. (26)

Bemerkung zur Totalreflektion an Grenzfläche II

[0061] An Grenzfläche II jeder Stufe soll der einfallende Strahl total reflektiert werden, d. h.

5
$$\beta_{1j} \geq \beta_T,$$

wobei

10
$$\beta_T = \arcsin \frac{n_L}{n_{PM}} = 42,10998^\circ$$

15 der materialabhängige Grenzwinkel für Totalreflektion ist. Randstrahl a_i trifft im Vergleich mit den anderen Strahlen einer Stufe i unter dem kleinsten Winkel

$$\beta_{1j}$$

20 auf Grenzfläche II_j . Mit Gl. (14) und (1) ergibt sich als einschränkende Bedingung für den Winkel

$$\alpha_{a_i},$$

25 den Randstrahl a_i mit der x -Achse vor dem Auftreffen auf Grenzfläche I_j einschließt:

Gl.(27)

[0062] Für jede Stufe wird die Totalreflektionsbedingung bezogen auf den Randstrahl a_i überprüft.

30

C. II. Mittenteil

[0063] Zur Mitte hin werden die Stufen der Linse immer spitzwinkliger, so daß es aus fertigungstechnischen Gründen nicht möglich ist, den stufenförmigen Bereich bis zur Mitte hin zu vervollständigen. Daher wird im Mittenbereich der Linse über die Eikonaltheorie eine asphärisch gekrümmte Innenfläche 28 berechnet. Die Außenfläche (Austrittsfläche 13) verläuft in diesem Bereich senkrecht zur x -Achse. Als y -Koordinate für diesen Planenteil der Austrittsfläche 13 wird der Wert flx_{11a} genommen, d. h. die x -Koordinate des Punktes des Außenflächenabschnittes der letzten Stufe, an dem der Randstrahl a für die letzte Stufe austritt. Als Eikonalwert für den Mittenteil der Linse wird der Wert des Eikonals für einen Strahl berechnet, der in

40

$$(x_{S_{11b}}, y_{S_{11b}})$$

45 auf die Linse trifft und dort zu einem Parallelstrahl zur x -Achse gebrochen werden soll, so daß er senkrecht auf den planen Teil der Außenfläche trifft:

Gl. (28)

[0064] Damit werden die Koordinaten (flx_M, fly_M) des Mitteninnenteils (Innenfläche 28) berechnet. Ein Strahl, der im Mittenbereich auf die Linse trifft, schließt mit der x -Achse einen Winkel α_M ein:

50

Gl. (29)

[0065] Der Eikonalwert dieses Strahls ergibt sich zu:

55

Gl. (30)

[0066] Einsetzen von C_M nach Gl. (28) und fly_M nach Gl. (29) in Gl. (30) sowie Auflösen nach flx_M ergibt:

Gl. (31)

[0067] Die zugehörige y-Koordinate fly_M kann aus Gl. (29) berechnet werden.

[0068] Abbildung 5 in Verbindung mit der nachfolgenden Tabelle offenbart reale Daten einer nach dem erfindungsgemäßen Verfahren herzustellenden Linse. Ebenso wie in Fig. 1 und 3 ist in Fig. 5 der halbe Querschnitt der Linse dargestellt. Die Linse erhält man durch Rotation um die x-Achse. Der Gesamtdurchmesser der Linse beträgt 70 mm. Im Mittenbereich 15 der Linse zwischen (x_{F1}, y_{F1}) und (x_{F2}, y_{F2}) verläuft die äußere Grenzfläche senkrecht zur x-Achse. Die Koordinaten der gekrümmten Außenfläche (Austrittsfläche 13) und des asphärisch gekrümmten Mittenteils 15 der Linse sind nicht angegeben, können aber wie oben angegeben berechnet werden.

10

Koordinaten (in mm) und Innenwinkel der Stufen:

[0069]

15 $x_{A1} = 0.0000000, y_{A1} = -31.0593937$
 $x_{A2} = 2.4537456, y_{A2} = -28.0464401$
 $x_{A3} = 4.4210187, y_{A3} = -25.0728429$
 $x_{A4} = 5.9873530, y_{A4} = -22.3451056$
 $x_{A5} = 7.2168987, y_{A5} = -19.8282662$
20 $x_{A6} = 8.1524226, y_{A6} = -17.4829267$
 $x_{A7} = 8.8206540, y_{A7} = -15.2778208$
 $x_{A8} = 9.2269386, y_{A8} = -13.1774340$
 $x_{A9} = 9.3766225, y_{A9} = -11.1746235$
 $x_{A10} = 9.2429762, y_{A10} = -9.2429762$
25 $x_{A11} = 8.8741125, y_{A11} = -7.4462645$
 $x_{E1} = 3.8724230, y_{E1} = -35.0000000$
 $x_{E2} = 5.6454293, y_{E2} = -31.0593937$
 $x_{E3} = 7.7632058, y_{E3} = -28.0464401$
 $x_{E4} = 9.2369917, y_{E4} = -25.0728429$
30 $\chi_{E5} = 10.3946378, y_{E5} = -22.3451056$
 $x_{E6} = 11.2897853, y_{E6} = -19.8282662$
 $x_{E7} = 11.9454328, y_{E7} = -17.4829267$
 $x_{E8} = 12.3751453, y_{E8} = -15.2778208$
 $x_{E9} = 12.5521130, y_{E9} = -13.1774340$
35 $x_{E10} = 12.4769248, y_{E10} = -11.1746235$
 $x_{E11} = 12.0731980, y_{E11} = -9.2429762$
 $x_{M2} = 10.6343678, y_{M2} = -7.4462645$
 $x_{F3} = 16.0375527, y_{F3} = -35.0000000$
 $\delta_1 = 45.5000000^\circ$
40 $\delta_2 = 43.3500000^\circ$
 $\delta_3 = 41.6600000^\circ$
 $\delta_4 = 40.0100000^\circ$
 $\delta_5 = 38.3800000^\circ$
 $\delta_6 = 36.7800000^\circ$
45 $\delta_7 = 35.2100000^\circ$
 $\delta_8 = 33.7100000^\circ$
 $\delta_9 = 32.2400000^\circ$
 $\delta_{10} = 30.8500000^\circ$
 $\delta_{11} = 29.3200000^\circ$

50

55

Gleichungen (1) - (31)

$$5 \quad \alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha - \alpha_A \quad (1)$$

$$y_1 = -(\tan \alpha) x \quad (2)$$

$$10 \quad y_{I1} = (\tan \alpha_A) x + y_A - (\tan(\alpha_A)) x_A \quad (3)$$

$$\Rightarrow x_{S1} = \frac{-y_A + (\tan \alpha_A) x_A}{\tan \alpha + \tan(\alpha_A)} \quad (4)$$

$$15 \quad y_{S1} = -\tan \alpha \frac{-y_A + (\tan \alpha_A) x_A}{\tan \alpha + \tan \alpha_A} \quad (5)$$

$$20 \quad y_{ii} = m x + y_{S1} - m x_{S1} \quad (6)$$

$$y_{II} = -(\tan \delta) x + y_A + (\tan \delta) x_A \quad (7)$$

$$25 \quad \Rightarrow x_{S2} = \frac{y_A + (\tan \delta) x_A - y_{S1} + m x_{S1}}{m + \tan \delta} \quad (8)$$

$$30 \quad y_{S2} = -(\tan \delta) x_{S2} + y_A + (\tan \delta) x_A \quad (9)$$

$$y_{iii} = (\tan \gamma_3) x + y_{S2} - (\tan \gamma_3) x_{S2} \quad (10)$$

$$35 \quad \beta_2 + \gamma_3 + \delta = 90^\circ \quad (11)$$

$$\beta_1 = 90^\circ - \kappa_1 \quad (12)$$

$$40 \quad \kappa_1 + \alpha_A + \delta + 90^\circ + \alpha_2 = 180^\circ \quad (13)$$

$$\beta_1 = \alpha_A + \delta + \arcsin \left(\frac{n_L}{n_{PM}} \sin \alpha_1 \right) \quad (14)$$

$$45 \quad \tau_3 = 90^\circ - \alpha_A - \arcsin \left(\frac{n_L}{n_{PM}} \sin \alpha_1 \right) \quad (15)$$

$$50 \quad C = n_L \sqrt{x_{S1}^2 + y_{S1}^2} + n_{PM} \sqrt{(x_{S2} - x_{S1})^2 + (y_{S2} - y_{S1})^2} + \\ + n_{PM} \sqrt{(f1x - x_{S2})^2 + (f1y - y_{S2})^2} + n_L (r - f1x) \quad (16)$$

55

$$C = n_L \sqrt{x_{S1b}^2 + y_{S1b}^2} + n_{PM} \sqrt{(x_{S2b} - x_{S1b})^2 + (y_{S2b} - y_{S1b})^2} +$$

$$+ n_{PM} \sqrt{(f1x_b - x_{S2b})^2 + (f1y_b - y_{S2b})^2} + n_L (r - f1x_b) \quad (17)$$

$$f1y = (\tan \gamma_3) f1x + y_{S2} - (\tan \gamma_3) x_{S2} \quad (18)$$

$$f1x = \frac{C - n_L \sqrt{x_{S1} + y_{S1}} - n_{PM} \sqrt{(x_{S2} - x_{S1})^2 + (y_{S2} - y_{S1})^2} + n_{PM} x_{S2} \sqrt{1 + \tan^2 \gamma_3} - n_L}{n_{PM} \sqrt{1 + \tan^2 \gamma_3} - n_L} \quad (19)$$

$$f1y_1 = (\tan \gamma_{31b}) f1x_1 + y_{S21b} - (\tan \gamma_{31b}) x_{S21b} \quad (20)$$

$$y_{E1} = f1y_{1b} \quad (21)$$

$$x_{E1} = \frac{f1y_{1b} - y_{A1} - (\tan \delta_1) x_{A1}}{-\tan \delta_1} \quad (22)$$

$$y_{A1} = -(\tan \alpha_{(i-1)b}) x_{A_i} \quad (23)$$

$$\tan \alpha_{A1} = \frac{f1y_{ia} - y_{S2ia}}{f1x_{ia} - x_{S2ia}} \quad (24)$$

$$x_{E_{i,(i-1)}} = \frac{y_{A_i} + (\tan \delta_i) x_{A_i} - y_{A_{i-1}} + (\tan \alpha_{A_{i-1}}) x_{A_{i-1}}}{\tan \alpha_{A_{i-1}} + \tan \delta_i} \quad (25)$$

$$y_{E_{i,(i-1)}} = -(\tan \delta_i) x_{E_{i,(i-1)}} + y_{A_i} + (\tan \delta_i) x_{A_i} \quad (26)$$

$$\sin(90^\circ - \alpha_{a1} - \alpha_{A_i}) \geq \frac{n_{PM}}{n_L} \sin(\beta_T - \alpha_{A_i} - \delta_i) \quad (27)$$

$$C_M = n_L \sqrt{x_{S11b}^2 + y_{S11b}^2} + n_{PM} (f1x_{11a} - x_{S11b}) + n_L (r - f1x_{11a}) \quad (28)$$

$$\tan \alpha_M = \frac{f1y_M}{f1x_M} \quad (29)$$

$$C = n_L \sqrt{f1x_M^2 + f1y_M^2} + n_{PM} (f1x_{11a} - f1x_M) + n_L (r - f1x_{11a}) \quad (30)$$

$$f_{lxM} = \frac{C_M - f_{lx11a}(n_{PM} - n_L) - n_L \cdot r}{n_L \sqrt{1 + (\tan \alpha_M)^2} - n_{PM}} \quad (31)$$

Bezugszeichenliste:

10	Flächenlinse	C	optischer Weg
11	Punktlichtquelle	E	Kante
12	Eintrittsfläche	I	Oberseite
13	Austrittsfläche	II	Unterseite
14	halber Querschnitt	III	Außenfläche
15	Mittelteil	r	Referenzebene
16	Strahl	i	Stufe
17	Kuppel	α	Abstrahlwinkel relativ zur x-Achse
18	Strahl	α_A	Winkel der Oberseite I relativ zur x-Achse
19	Außenbereich	α_1	Einfallswinkel auf Grenzfläche I
20	Strahl	α_2	Ausfallswinkel an Grenzfläche I
21	Strahl	β_1	Einfallswinkel auf Grenzfläche II
22	Oberseite	β_2	Ausfallswinkel an Grenzfläche II
23	Stufe	γ_3	Winkel des Lichtstrahls nach Totalreflektion an Grenzfläche II relativ zur x-Achse
24	Unterseite		
25	Strahl		
26	Strahl		
27	Kante		
28	Innenfläche		
29	11. Stufe		
30			
31	1. Stufe		
A	Kante		

5	δ	Winkel der Unterseite 24 mit der X-Achse
	κ_1	Hilfswinkel
10	(flx_i, fly_i)	Koordinate entlang der Grenzfläche III der i-ten Stufe
15	(x_{A_i}, y_{A_i})	Koordinate des Eckpunkts der i-ten Stufe im Querschnitt
20	(x_{E_i}, y_{E_i})	Koordinate des Eckpunkts im Querschnitt beim Übergang von der Stufe i-1 zur Stufe i

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer Flächenlinse auf katadioptrischer Basis mit stufenförmiger Eintrittsfläche (12),
Reflektionsflächen und zumindest teilweise gekrümmter Austrittsfläche (13), wobei die Form der Flächenlinse (10)
wie folgt bestimmt wird:

a) ein radialer Querschnitt (14) wird stufenweise bestimmt, und zwar zunächst für eine beliebige erste Stufe
(Stufe 1), dann für die hierzu benachbarten Stufen, danach sukzessiv für alle weiteren benachbarten Stufen
bis die Querschnitte der einzelnen Stufen alle bestimmt sind,

b) ausgehend von

- vorbestimmten Winkeln von Oberseiten der Stufen relativ zu einer Mittelachse (x-Achse) der Linse,
- den Koordinaten

$$(x_{A_1}, y_{A_1})$$

- eines Eckpunktes A_1 der ersten Stufe bezogen auf den Ort (0,0) einer punktförmigen Lichtquelle (11),
- den Winkelbereichen, in welchen die einzelnen Stufen (i) Licht aufnehmen,
- einer Koordinate flx_1 eines äußersten Punktes (flx_1, fly_1) des Abschnitts der Austrittsfläche (13) der zur
ersten Stufe (i=1) gehört,
- und einem Winkel δ_1 einer Reflektionsfläche der ersten Stufe,

c) werden zunächst die Koordinate fly_1 des äußersten Punktes (flx_1, fly_1) , das Eikonal und die weiteren Koordinaten
 (flx_1, fly_1) der Austrittsfläche (13) für die erste Stufe ermittelt und zwar für eine der gewünschten Genauigkeit
entsprechende Anzahl an Lichtstrahlen,

d) auf der Basis der für die erste Stufe ermittelten Daten werden die Daten einer zweiten Stufe, dann einer dritten
Stufe, usw., insgesamt für alle Stufen, ermittelt,

e) schließlich werden für einen keine Reflektionsflächen aufweisenden Mittenbereich (Mittelteil 15) der Linse

(10) die Daten einer gekrümmten Eintrittsfläche (Innenfläche 28) unter Beachtung der Eikonalbedingung und unter Vorgabe der Austrittsfläche (13) ermittelt,

f) die komplette äußere Form der Linse (10) wird durch Rotation des radialen Querschnitts (14) um eine Mittelachse (x-Achse) bestimmt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß der radiale Querschnitt stufenweise, nämlich mit der äußersten Stufe 1 beginnend und Stufe für Stufe nach innen fortschreitend bestimmt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß folgende Bedingungen vorgegeben werden:

- die Winkel

$$\alpha_{A_i}$$

von Oberseiten (22) aller Stufen (i) relativ zur Mittelachse (x-Achse) sind gleich 0,

- die Oberseiten (22) und Reflektionsflächen (Unterseiten 24) sind eben.

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Winkel δ_1 der Reflektionsfläche (Unterseite 24) relativ zur Mittelachse (x-Achse) iterativ ermittelt wird und zwar durch Variation, bis ein Strahlenabschnitt y_{ij} für einen inneren Randstrahl b auf dem Punkt mit den Koordinaten (fx_1, fly_1) liegt.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß beim Übergang von einer ersten Stufe zur benachbarten (inneren) zweiten Stufe zunächst ein Schätzwert der x-Koordinate des Eckpunktes A_2 der zweiten Stufe, nämlich

$$x_{A_2}$$

angenommen wird, daß aufgrund der vorbestimmten Winkelbereiche, in denen die Stufen Licht aufnehmen und aufgrund der vorbestimmten Winkel

$$\alpha_{A_i}$$

der Oberseiten der Stufen i die y-Koordinate vom Eckpunkt A_2 und damit der erste Punkt

$$(x_{A_2}, y_{A_2})$$

errechnet werden, daß dann der Winkel δ_2 der Reflektionsfläche der zweiten Stufe iterativ ermittelt wird, bis ein Strahlenabschnitt y_{ij} für einen inneren Randstrahl b der zweiten Stufe auf dem Punkt mit den Koordinaten (fx_2, fly_2) liegt, wobei dieser Punkt (fx_2, fly_2) der nächstliegenden Koordinate (fx_1, fly_1) der ersten Stufe entsprechen soll, daß der Winkel zwischen dem inneren Randstrahl b der zweiten Stufe und dem äußeren Randstrahl a der ersten Stufe vor Austritt aus der Linse überprüft und minimiert wird durch Variation von

$$x_{A_2}$$

und anschließende Iteration von δ_2 und daß dann unter Beachtung der Eikonalbedingung die weiteren Punkte (fx_2, fly_2) der zweiten Stufe ermittelt werden.

6. Verfahren nach mindestens einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Winkel δ_1 der Reflektionsfläche der ersten Stufe - bei rechtem Winkel zwischen äußerem Randstrahl a und Eintrittsfläche (12) größer als 45° , jedoch möglichst dicht an 45° gewählt wird.

7. Verfahren nach mindestens einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Winkel zwischen Reflektionsfläche und Eintrittsfläche in jeder Stufe so gewählt wird, daß ein Strahlenabschnitt iii des äußeren Randstrahls a in diesem Bereich einen möglichst kleinen Winkel mit der Eintrittsfläche bildet.
- 5 8. Verfahren nach mindestens einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Mittenbereich (Mittelteil 15) der Linse (10) eine ebene Austrittsfläche (13) aufweist.
9. Verfahren nach mindestens einem der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Mittenbereich (Mittelteil 15) der Linse (10) eine Austrittsfläche (13) aufweist, die in Fortsetzung der einzelnen Stufen konvex gekrümmt ist.
- 10 10. Verfahren zur Herstellung einer Flächenlinse auf katadioptrischer Basis mit stufenförmiger Eintrittsfläche (12), Reflektionsflächen und zumindest teilweise gekrümmter Austrittsfläche (13), wobei die Form der Flächenlinse (10) wie folgt bestimmt wird:
- 15 a) ein radialer Querschnitt (14) wird stufenweise bestimmt, und zwar zunächst für eine beliebige erste Stufe (Stufe 1), dann für die hierzu benachbarten Stufen, danach sukzessiv für alle weiteren benachbarten Stufen bis die Querschnitte der einzelnen Stufen alle bestimmt sind,
- 20 b) ausgehend von
- vorbestimmten Winkeln
- 25 α_{A_i}
- von Oberseiten der Stufen relativ zu einer Mittelachse (x-Achse) der Linse,
 - den Koordinaten
- 30 (x_{A_1}, y_{A_1})
- eines Eckpunktes A_1 der ersten Stufe bezogen auf den Ort (0,0) einer punktförmigen Lichtquelle (11),
 - den Winkelbereichen, in welchen die einzelnen Stufen (i) Licht aufnehmen,
 - und Koordinaten eines äußersten Punktes (fx_1, fly_1) des Abschnitts der Austrittsfläche (13) der zur ersten Stufe (i=1) gehört,
- 35 c) werden zunächst der Winkel δ_1 einer Reflektionsfläche der ersten Stufe, das Eikonal und die weiteren Koordinaten (fx_1, fly_1) der Austrittsfläche (13) für die erste Stufe ermittelt und zwar für eine der gewünschten Genauigkeit entsprechende Anzahl an Lichtstrahlen,
- 40 d) auf der Basis der für die erste Stufe ermittelten Daten werden die Daten einer zweiten Stufe, dann einer dritten Stufe, usw., insgesamt für alle Stufen, ermittelt,
- 45 e) schließlich werden für einen keine Reflektionsflächen aufweisenden Mittenbereich (Mittelteil 15) der Linse (10) die Daten einer gekrümmten Eintrittsfläche (Innenfläche 28) unter Beachtung der Eikonalbedingung und unter Vorgabe der Austrittsfläche (13) ermittelt,
- 50 f) die komplette äußere Form der Linse (10) wird durch Rotation des radialen Querschnitts (14) um eine Mittelachse (x-Achse) bestimmt.
11. Flächenlinse mit stufenförmiger Eintrittsfläche (12), Reflektionsflächen und Austrittsfläche (13), wobei folgende Bedingungen erfüllt sind:
- 55 a) die Eintrittsfläche (12) ist unterteilt in äußere konzentrische Stufen und ein Mittelteil (15),
- b) das Mittelteil (15) ist auf einer Eintrittsseite asphärisch gekrümmt und auf einer Austrittsseite plan, wobei die Krümmung auf der Eintrittsseite - bei zueinander parallelen Strahlen auf der Austrittsseite und einer punktför-

migen Lichtquelle auf der Eintrittsseite - derart ist, daß die Eikonalbedingung innerhalb jeder Stufe erfüllt ist,

c) jede Stufe weist Oberseite, Unterseite und Außenseite auf, wobei die Oberseite Eintrittsseite ist, die Unterseite total reflektiert und die Außenseite Austrittsfläche ist,

5

d) die Außenseiten der Stufen gehen ineinander über unter Bildung der gemeinsamen Austrittsfläche (13) der Linse (10) wobei auch die plane Austrittsseite des Mittelteils (15) Teil der gemeinsamen Austrittsfläche (13) ist,

10

e) Oberseiten und Unterseiten sind plan,

f) die Außenseiten der Stufen sind gekrümmt, wobei die Krümmungen derart sind, daß die Eikonalbedingung innerhalb jeder Stufe erfüllt ist.

15

12. Linse nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberseiten der Stufen parallel zu einer Mittelachse (x-Achse) der Linse (10) verlaufen.

13. Flächenlinse hergestellt in einem Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 9.

20

25

30

35

40

45

50

55

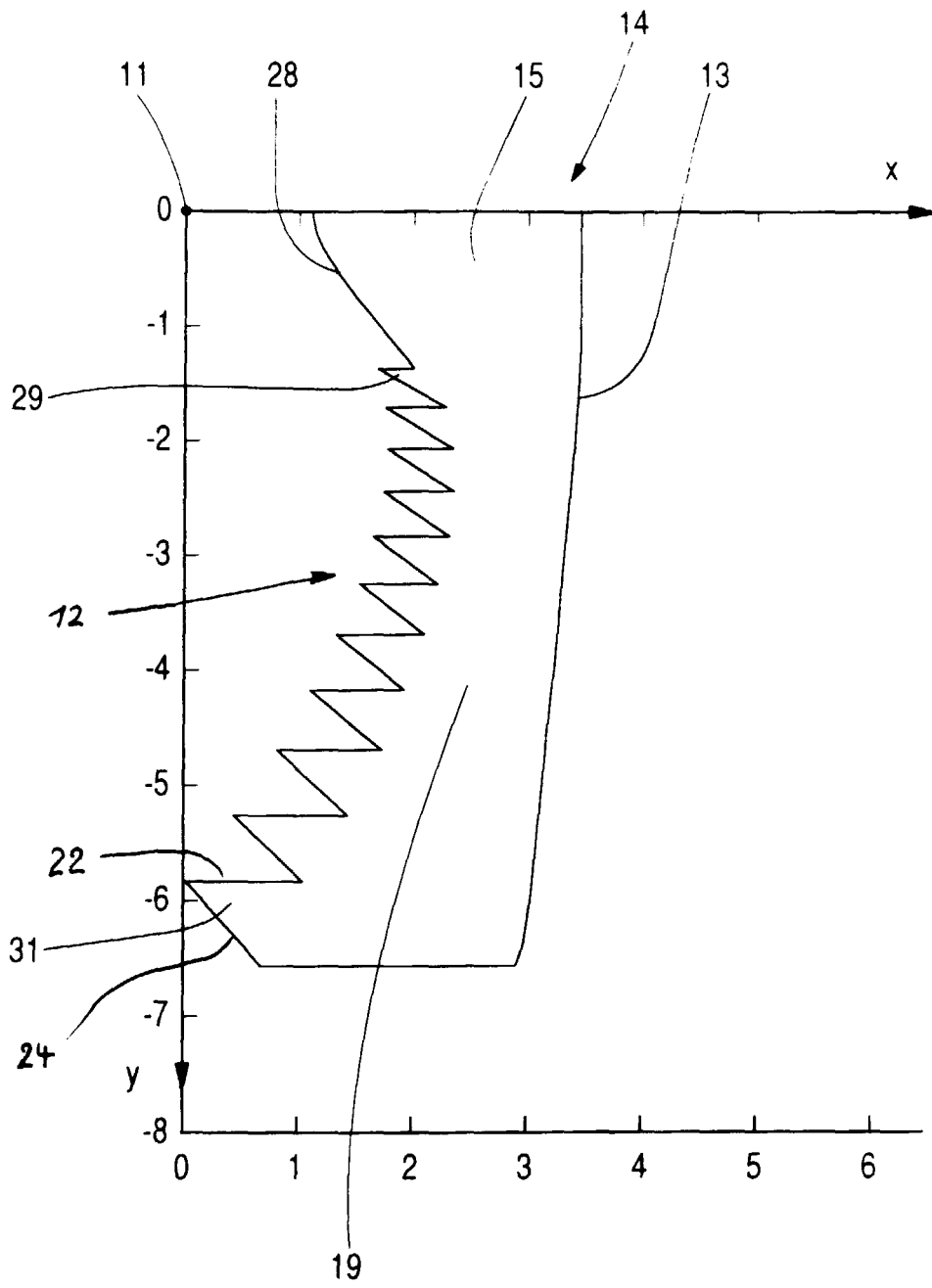


Fig. 1

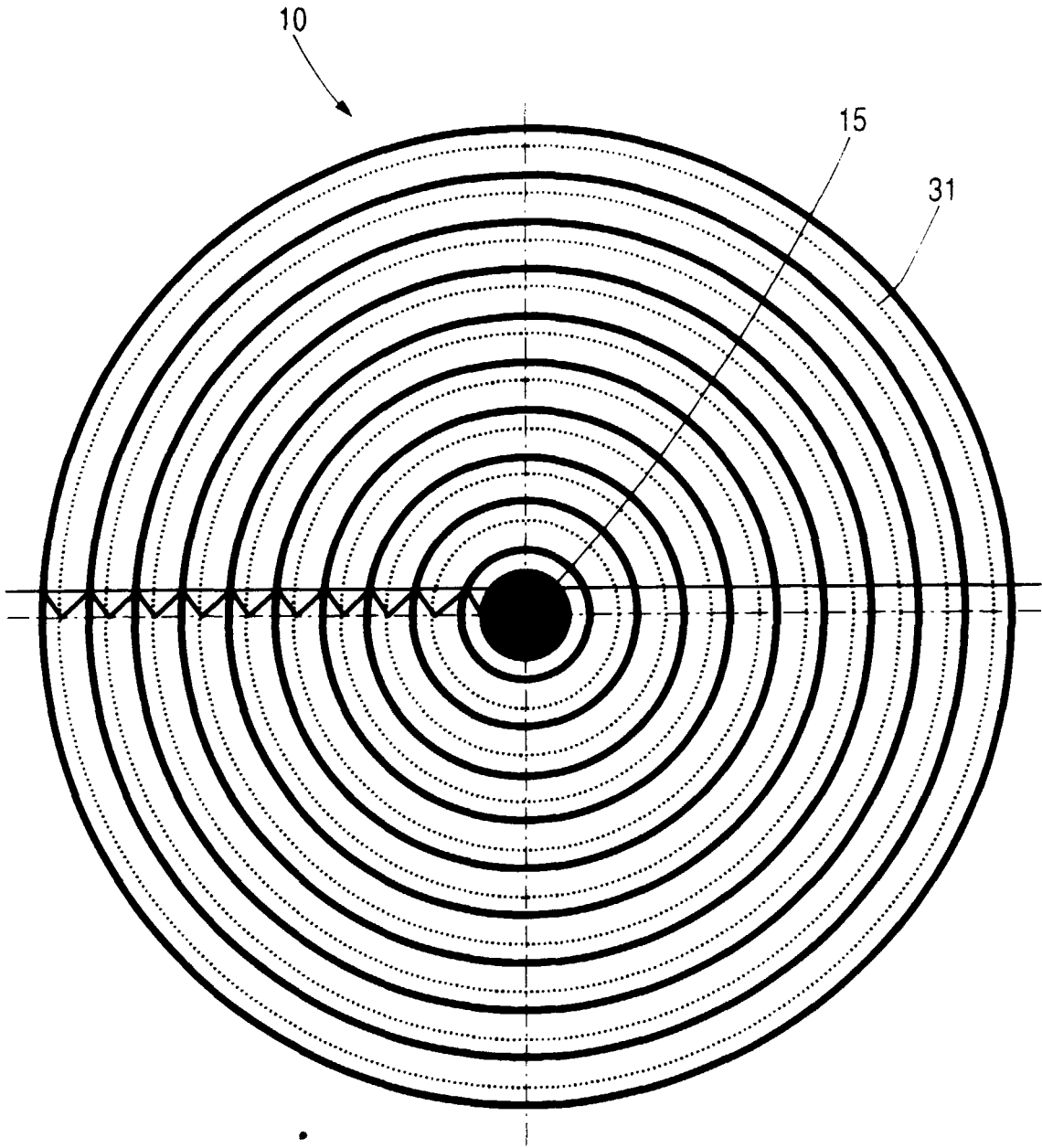


Fig. 2

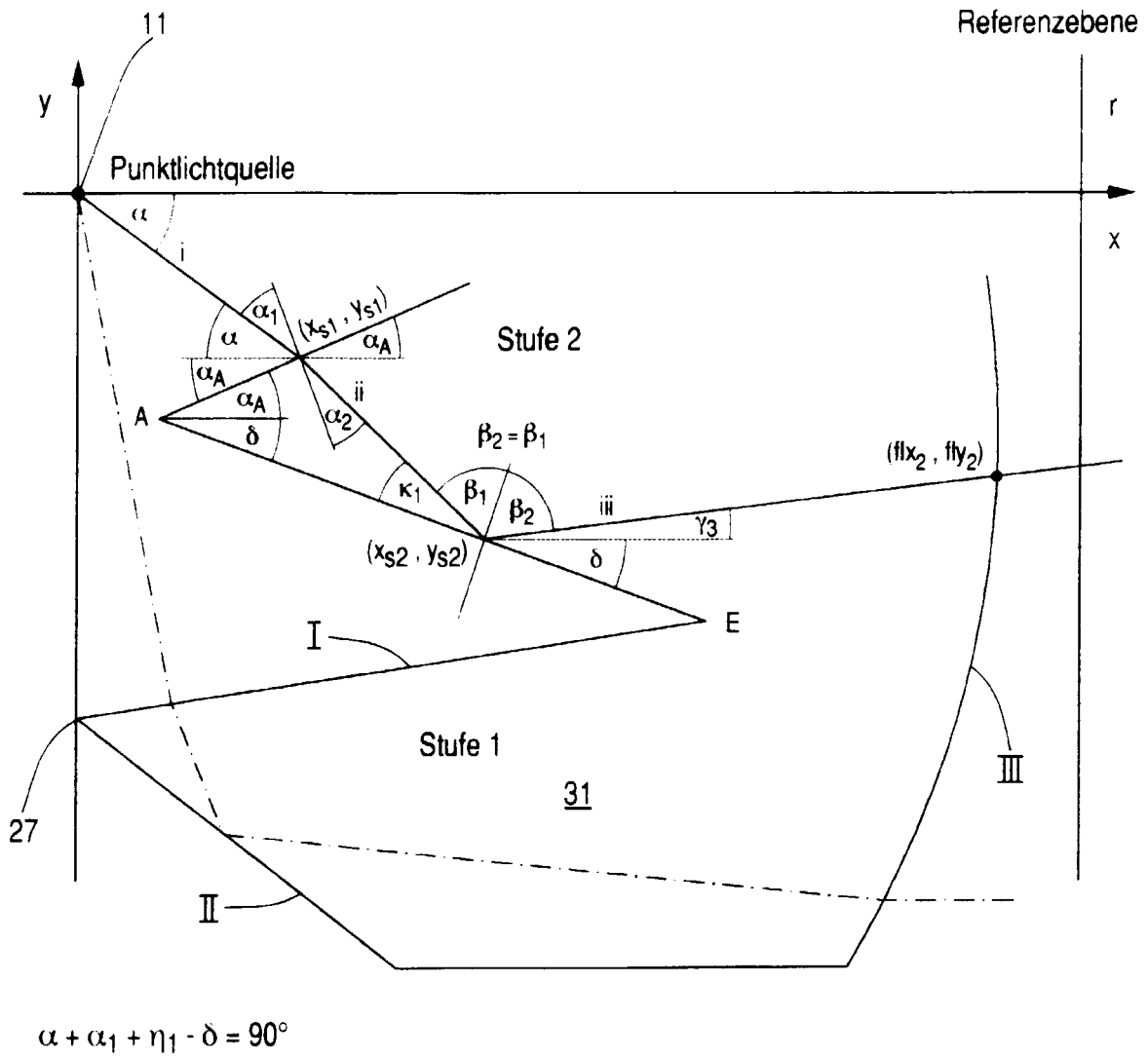


Fig. 4

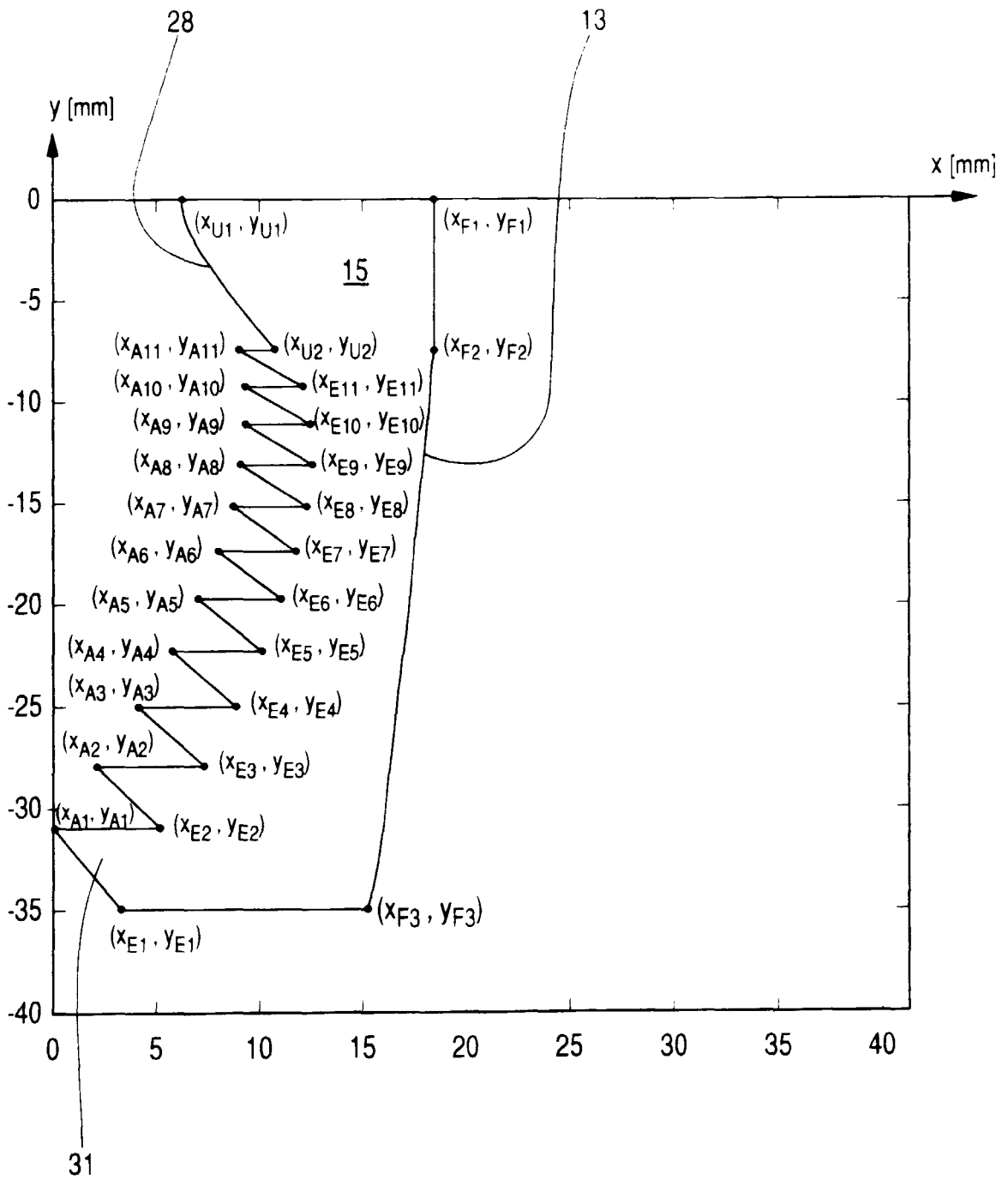


Fig. 5